

# 饲料粉碎技术<sup>1</sup>

## FEED GRINDING TECHNOLOGY

王卫国 教授

郑州工程学院生物工程系

粉碎是所有配合饲料产品加工中的必要工段，也是能耗最高的工段之一。饲料粉碎技术对提高饲料原料的营养价值、动物生产性能和控制加工成本，具有重大研究开发价值。

### 粉碎的基本概念

**粉碎** 通过撞击、剪切、研磨或其它方法，使物料颗粒变小。

**微粉碎** 将物料粉碎至全通过 0.42mm 筛孔(40 目筛)的粉碎。主要用于加工水产饲料、饲料添加剂。

**超微粉碎** 将物料粉碎至 95%通过 0.15mm 筛孔(100 目筛)的粉碎。主要用于加工特殊水产饲料和饲料添加剂。

**饲料粉碎粒度** 指粉状饲料产品的粒度；或在混合之后、制粒、膨化之前的混合粉料的粒度；或经粉碎的饲料原料的粒度。

**重量几何平均粒径** 该法是采用筛号为 4、6、8、12、20、30、40、50、70、100、140、200、270 的 14 层标准筛，筛分 100 克样品，然后分别称各层筛上物和底筛筛上物质量，并依此计算出重量几何平均粒径和重量几何标准差。该法的优点是既可以准确反映饲料粒度，又可以反映饲料粒度的变异情况。

**饲料的最佳粉碎粒度** 指使饲养动物对饲料具有最大利用率或获得最佳生产性能且不影响动物健康，经济上又合算的重量几何平均粒度。

---

<sup>1</sup>单行本编号是 FE6-2000 及其扩充的第二稿 FE1 - 02

## 饲料粉碎粒度对饲料营养价值和 动物生产性能的影响

### 1. 饲料粉碎粒度会显著影响饲料养分在消化液中的溶解度

作者等人对 6 种饲料原料的粉碎粒度与蛋白质的溶解度的关系进行了研究，结果见表 1。

表 1 6 种饲料原料在粉碎前后的蛋白质溶解度比较

饲料原料	粗蛋白 %	蛋白质溶解度%					
		粉碎前	粉碎 (4mm 筛)	粉碎 (2.5mm 筛)	粉碎 (1.5mm 筛)	粉碎 (1.0mm 筛)	粉碎 (0.6mm 筛)
去皮豆粕 (东海)	48.60	78.00 <sup>a</sup>	79.50 <sup>b</sup>	81.00 <sup>c</sup>	83.20 <sup>d</sup>	92.50 <sup>e</sup>	94.08 <sup>f</sup>
带皮豆粕 (东海)	46.50	71.20 <sup>a</sup>	74.00 <sup>b</sup>	74.70 <sup>c</sup>	77.50 <sup>d</sup>	80.05 <sup>e</sup>	83.50 <sup>f</sup>
带皮豆粕 (当地)	42.59	56.28 <sup>a</sup>	62.34 <sup>b</sup>	65.93 <sup>c</sup>	69.17 <sup>d</sup>	71.33 <sup>e</sup>	74.34 <sup>f</sup>
棉 粕	44.42	43.76 <sup>a</sup>	49.84 <sup>b</sup>	50.56 <sup>b</sup>	51.37 <sup>c</sup>	52.00 <sup>c</sup>	53.89 <sup>d</sup>
玉 米	8.38	--	46.54 <sup>a</sup>	46.78 <sup>a</sup>	48.09 <sup>b</sup>	58.00 <sup>c</sup>	59.90 <sup>d</sup>
麸 皮	17.80	72.58 <sup>a</sup>	72.81 <sup>ab</sup>	73.37 <sup>b</sup>	75.17 <sup>c</sup>	75.90 <sup>d</sup>	75.84 <sup>d</sup>

注：同一行内标有不同字母者表示差异显著，标有相同字母者表示差异不显著。

由表 1 可看出，试验所测定的 6 种原料的蛋白质溶解度都随粉碎粒度的减小而增加。经方差分析，6 种原料的蛋白质溶解度与粉碎后的对数几何平均粒度的相关性极显著 ( $P < 0.01$ )，即减小粉碎粒度可显著提高玉米等五种原料的蛋白质溶解度，为动物消化道中消化酶的有效消化提供了基础。其中，去皮豆粕（东海）、带皮豆粕（东海）与带皮豆粕（当地）的各粉碎粒度之间的蛋白质溶解度

差异均达到极显著水平。表明粉碎可以持续显著地提高去皮豆粕、带皮豆粕的蛋白质溶解度。

应用 SPSS 统计学分析软件,对 6 种原料粉碎后的 5 种不同对数几何平均粒度与蛋白质溶解度数据进行回归分析,得到线性回归方程,其相关性经显著性检验,达到极显著水平(表 2)。

表 2 粉碎后的对数几何平均粒度(X)与蛋白质溶解度(Y)的回归方程

原 料	回 归 方 程	R	显著性
去皮豆粕(东海)	$Y=101.069-0.0344X$	0.948	$P<0.005$
带皮豆粕(东海)	$Y=86.109-0.0165X$	0.978	$P<0.005$
带皮豆粕(当地)	$Y=75.022-0.0129X$	0.917	$P<0.01$
棉 粕	$Y=56.493-0.0169X$	0.993	$P<0.01$
玉 米	$Y=76.671-0.0502X$	0.965	$P<0.01$
麸 皮	$Y=78.330-0.0097X$	0.939	$P<0.01$

## 2. 粉碎粒度会显著影响饲料原料蛋白质的体外消化率

作者等人对 7 种饲料原料进行了 5 种粉碎粒度的体外胃蛋白酶、胰蛋白酶消化率实验,结果见表 3。

由表 3 可见,就胃蛋白酶消化率而言,从不同原料之间进行比较可见,在同样筛孔条件下,去皮豆粕的蛋白质消化率最高,其次为带皮豆粕(当地)、麸皮、带皮豆粕(东海)。棉粕和菜粕的消化率最低。这与王卫国等(2000)所做的另一项研究结果基本一致。玉米的胃蛋白酶消化率对粉碎粒度的敏感性最大,其次棉粕、去皮豆粕、当地带皮豆粕,而其余 3 种原料的消化率对粉碎粒度变化敏感性较小。对每种原料的不同粉碎粒度下的胃蛋白酶消化率进行方差分析表明,去皮豆粕(东海)、带皮豆粕(东海)、带皮豆粕(当地)、玉米的各消化数据之间均存在

表3 饲料原料在不同粉碎粒度下的蛋白质体外消化率(%)

孔径 (mm)	去皮豆粕		带皮豆粕		带皮豆粕		菜粕		棉粕		玉米		麸皮	
	(东海)		(东海)		(当地)									
	胃酶	胃胰酶	胃酶	胃胰酶	胃酶	胃胰酶	胃酶	胃胰酶	胃酶	胃胰酶	胃酶	胃胰酶	胃酶	胃胰酶
0.6mm	71.44 <sup>e</sup>	83.22 <sup>e</sup>	58.71 <sup>e</sup>	69.01 <sup>e</sup>	64.26 <sup>e</sup>	76.18 <sup>e</sup>	49.67 <sup>c</sup>	60.00 <sup>b</sup>	49.77 <sup>d</sup>	60.55 <sup>d</sup>	54.59 <sup>e</sup>	62.35 <sup>e</sup>	63.47 <sup>c</sup>	75.94 <sup>c</sup>
1.0mm	70.01 <sup>d</sup>	81.14 <sup>a</sup>	58.48 <sup>d</sup>	68.39 <sup>d</sup>	59.56 <sup>d</sup>	73.97 <sup>d</sup>	49.03 <sup>c</sup>	59.02 <sup>b</sup>	48.80 <sup>d</sup>	59.61 <sup>d</sup>	49.59 <sup>d</sup>	60.74 <sup>d</sup>	62.08 <sup>c</sup>	75.10 <sup>c</sup>
1.5mm	65.21 <sup>c</sup>	78.72 <sup>a</sup>	57.05 <sup>c</sup>	67.05 <sup>c</sup>	51.78 <sup>c</sup>	64.84 <sup>c</sup>	48.09 <sup>b</sup>	58.50 <sup>b</sup>	42.24 <sup>c</sup>	53.46 <sup>c</sup>	37.33 <sup>c</sup>	48.53 <sup>c</sup>	60.76 <sup>c</sup>	74.49 <sup>c</sup>
2.5mm	62.32 <sup>b</sup>	74.09 <sup>a</sup>	55.50 <sup>b</sup>	65.35 <sup>b</sup>	48.14 <sup>b</sup>	62.84 <sup>b</sup>	47.89 <sup>b</sup>	56.14 <sup>b</sup>	40.40 <sup>b</sup>	51.36 <sup>b</sup>	35.30 <sup>b</sup>	46.60 <sup>b</sup>	60.20 <sup>b</sup>	69.84 <sup>b</sup>
4.0mm	58.59 <sup>a</sup>	70.25 <sup>a</sup>	53.01 <sup>a</sup>	62.40 <sup>a</sup>	42.06 <sup>a</sup>	55.86 <sup>a</sup>	44.15 <sup>a</sup>	52.31 <sup>a</sup>	34.15 <sup>a</sup>	45.35 <sup>a</sup>	27.82 <sup>a</sup>	38.16 <sup>a</sup>	58.43 <sup>a</sup>	64.87 <sup>a</sup>

注：表中同列中数字右上角标有相同字母时表示差异不显著，标有不同字母时表示差异显著 (P<0.05)

显著差异，表明粉碎可显著提高它们的消化率。而菜粕、麸皮部分消化数据之间差异不显著。

从粉碎粒度与胃蛋白酶-胰蛋白酶总消化率来看，去皮豆粕（东海）具有最高的消化率，其次是带皮豆粕（当地）麸皮、带皮豆粕（东海）。而棉粕、菜粕的总消化率较低。棉粕、菜粕的消化率低的原因可能是粗纤维含量较高，同时存在抗营养因子，如抗胰蛋白酶，植酸，棉酚等，影响了酶活性的发挥，影响了蛋白质的消化率。另外，制油加工的工艺条件也是影响蛋白质消化率的重要因素。去皮豆粕的加工工艺条件先进正是得到高消化率的重要保证，因此应推广先进的制油工艺。

### 3. 猪饲料的最佳粉碎粒度研究

1) 仔猪饲料粉碎粒度研究 国外仔猪饲料的粉碎粒度研究结果主要集中在谷物。综合各项研究结果，仔猪谷物的粉碎粒度以 300-500 $\mu\text{m}$  为最适合（表 4），其中，断奶仔猪在断奶后 0-14 天，以 300 $\mu\text{m}$  为宜，断奶后 15 天以后以 500 $\mu\text{m}$  为宜。仔猪饲料的适合粒度随谷物种类的不同而变化（Ohh, 1999）。Goodband 等报道，大麦需粉碎为较大的粒度（600~700 $\mu\text{m}$ ）更合适。Hale 等（1979）则报道，小麦粗粉碎比细粉碎的饲料效率和动物生产性能要好，而玉米在细粉碎时饲料效率与动物生产性能更佳（Reiman, 1968；Hedde, 1985）。

王卫国等（2000）研究了仔猪饲料中玉米、豆粕的三种粉碎粒度及配合饲料粒度对仔猪生产性能和饲料利用效率的影响。使用的粉碎机筛孔直径为 2.5mm、3.0mm 和 4.5mm，粉碎后物料的几何平均粒度对玉米为 261、352、432 $\mu\text{m}$ ，豆粕粒度为 388、414、498 $\mu\text{m}$ ，配合饲料的粒度为 282、323、345 $\mu\text{m}$ 。

三种粒度的饲料产品对猪的生产性能和饲料利用情况见表 5。由表 5 可以看出，就增重水平而言，采用 3mm 筛孔加工的试验组 C、D 的增重最高，平均为 56.75kg，采用 2.5mm 筛孔的试验组增重次之，平均为 55kg，采用 4.5mm 筛孔的试验组的增重最差。从料肉比看，以 3.0mm 筛孔试验料组的仔猪的效果最好，平均为 2.22。饲料干物质和粗蛋白的消化率以中粒度组最高，细粒度组次之，粗粒度组最差。

2) 母猪饲料粉碎粒度研究 有关母猪饲料的粉碎粒度研究报道的较少。但适宜的粉碎粒度同样可提高母猪的采食量和营养成分的消化率，减少母猪粪便的排出量。Wandra 等人（1995）将玉米粉碎为四种粒度（1200 $\mu\text{m}$ 、900 $\mu\text{m}$ 、600 $\mu\text{m}$ 、400 $\mu\text{m}$ ）配制成日粮饲喂 100 头初产母猪，结果表明，粒度由 1200 $\mu\text{m}$  降低到 400 $\mu\text{m}$ ，平均日

表 4 仔猪饲料的最佳粉碎粒度 (μm)

阶 段	主要谷物	最佳生产性 能粒度	最好消化率 粒度	参考文献
哺乳仔猪	玉米	500	500	Healy 等, 1994
	高粱	500	500	Healy 等, 1994
哺乳仔猪	玉米	400	400	Chae, 1996
	高粱	400	400	Chae, 1996
断奶仔猪	大麦	500		Goodband 等, 1988
	玉米	500	500	Giessmann 等, 1990
	硬高粱	500	300	Giessmann 等, 1990
	软高粱	500	500	Giessmann 等, 1990
	大麦	634		Goodband 等, 1993
开食仔猪	玉米高粱	500		Healy 等, 1994

表 5 饲料粒度对试验猪生产性能和饲料利用的影响

项 目	粗粒度	中粒度	细粒度
	筛孔 4.5mm	筛孔 3.0mm	筛孔 2.5mm
平均增重 kg	48.75	56.75	55.00
平均采食量 kg	122.0	126.2	123.6
平均料肉比	2.50	2.22	2.48
干物平均消化率%	81.82	86.46	85.81
蛋白平均消化率%	79.81	86.87	83.85

采食量由 4.19 增加到 4.43kg/d，能量消化率由 83.8%增加到 90%，消化能摄入量由 13.7Mcal/d 增加到 15.6Mcal/d，窝增重由 34.9kg 增加到 38.6kg。由于降低粒度提高了养分消化率，粪便的干物质排出量减少了 21%，粪便中氮的排出量减少了 31%，这对降低粪便处理负担产生了明显影响。母猪饲料的粉碎粒度以 400-500 $\mu\text{m}$  最适宜。

3) 生长育肥猪饲料粉碎粒度研究 谷物粉碎粒度对生长育肥猪的饲养效果见表 6。Mahan 等 (1966) 和 Lawrence (1983) 曾报道，谷物粒度减小会改善体增重和饲料转化率。Giesemann 等 (1990) 也报导降低玉米粒度会提高 5%的体增重及 9%的饲料转化率。Wandra 等人(1995)用 1000-400 $\mu\text{m}$  粒度范围的玉米配制成日粮对育肥猪做饲喂试验，结果表明，粒度每降低 100 $\mu\text{m}$  能改善 1.3%的饲料效率，N 的排泄量减少。但在最小粒度时，出现猪胃肠损伤和角质化现象。试验表明，玉米的最适粉碎粒度在 600-500 $\mu\text{m}$ 。Philips (1995) 用粒度小的饲料进行制粒后饲喂育肥猪，粪内的干物质减少 27%。

4) 饲料粒度对猪消化器官的影响 饲料的粒度对猪的胃肠道形态学有影响。饲料粉碎过细会引起猪胃不良反应，导致胃肠角质化和损害 (Maxwell 等, 1970, 1972; Cabrera 等, 1993; Healy 等 1994; Phillips, 1995; Wondra 等, 1995)。过细粉碎导致胃肠内容物流动性增加，使内容物的混合度增加，引起酸分泌和胃蛋白酶活性增加，最终导致食管胃的溃疡增加 (Maxwell 等, 1972)。

#### 4. 鸡饲料最佳粉碎粒度研究

1) 肉鸡饲料粉碎粒度研究 Douglas 等 (1990) 将锤片粉碎机与辊式粉碎机加工的玉米、低丹宁高粱和高丹宁高粱分别加入到饲料中饲喂 21 日龄的肉鸡。锤片粉碎机加工的饲料的对数几何平均粒度为 874 $\mu\text{m}$ ，辊式粉碎机加工的饲料的对数几何平均粒径为 1681 $\mu\text{m}$ 。结果表明，食入粒度小的饲料的鸡的增重显著高于采食大粒度饲料的鸡的增重。

Nir 等 (1990) 分别用锤片粉碎机和辊式粉碎机粉碎出三种不同粒径的物料，即 555 $\mu\text{m}$  (细)、702 $\mu\text{m}$  (中)、888 $\mu\text{m}$  (粗)。在 10 天的选择试验中，小鸡更喜欢采食较大粒度的饲料。粒度越大，鸡的采食量越高。在日粮中添加同一种谷物饲喂 7-21 日龄的肉鸡，饲料越粗，采食量增加越明显。这导致了鸡体重的显著增加。

在一系列的四组试验 (每组 2400 只肉鸡) 中，Reece 等 (1986) 使用不同孔径的筛片 (4.76mm, 6.35mm) 粉碎饲料，并用两种粒度不同的粉碎饲料饲喂肉鸡，结果表明，在 21 日龄或 42 日龄时鸡的增重和饲料转化率在组别之间没有差异。

表 6 饲料粒度对生长育肥猪生产性能的影响

项 目	粒 度 ( $\mu\text{m}$ )			体重 范围 (kg)	试验 猪数	谷物	参考 文献
	粗 (>1000)	中 (700-900)	细 (<600)				
ADG kg	0.71	0.79	0.74	19-55	36	玉米	Mahan 等, 1996
G/F	0.337	0.329	0.341				
ADG kg	0.62	0.74	0.73	25-70	72	燕麦	Lawrence, 1 983
G/F	0.322	0.366	0.362				
ADG kg	0.68	--	0.73	35-97	160	玉米	Hedde 等, 1985
G/F	0.266	--	0.288				
ADG kg	0.686	--	0.719	32-91	192	玉米	Gi esemann, 1990
G/F	0.257	--	0.279				
ADG kg	0.696	--	0.699	32-91	192	高粱	Gi esemann, 1990
G/F	0.259	--	0.272				
ADG kg	0.98	0.98	0.99	55-115	160	玉米	Wondra 等, 1995
G/F	0.298	0.305	0.321				

引自：Wondra, 1996

Lot 等 (1992) 用锤片粉碎机将玉米粉碎成不同粒度，配入饲料，并用其制成碎粒饲料。在第一个试验中，粉碎筛片孔径为 3.18mm 和 9.59mm，得到的粉碎物对数几何平均粒度为 716 $\mu\text{m}$  和 1196 $\mu\text{m}$ 。饲喂结果显示，采食 716 $\mu\text{m}$  粒度饲料的鸡的个体增重和饲料转化率有明显提高。但在第二个试验中，玉米被粉碎成 690-974 $\mu\text{m}$  的粒度，并被制成碎粒饲料饲喂肉鸡，结果在体增重和饲料利用率上无差异。

饲料粉碎物粒度的均一性会影响肉鸡的生产性能。Nir 等 (1994) 将同一种谷物粉碎样品筛分成不同的部分。然后将不同的部分加入饲料中饲喂肉鸡。饲喂中等粒度玉米的肉鸡获得了最佳的生产性能。而另两组由粒度 1102 $\mu\text{m}$  和 525 $\mu\text{m}$  的玉米混合的饲料的饲喂效果就达不到前者的水平。

根据粒径的不同,将粉碎谷物筛分成不同的几个部分,对其营养组成没有影响。Nir 等 (1994) 用筛子将粉碎玉米分成几部分,发现不同部分的营养成分含量没有什么差别。而 Martin (1983) 将玉米、高粱粉碎成不同的粒径。结果不论是粉碎细度或是两种谷物在混合、制粒时的加工方式对营养成分的变异没有影响。综合上述研究结果,肉鸡的饲料谷物的粉碎粒度在 700-900 $\mu\text{m}$  为宜。

表 7 三个试验组测定的综合指标

项 目	试验组 A	试验组 B	试验组 C
粪便中水分含量 %	8.9	8.5	11.3
粪便干物质含量 %	10.0	10.3	10.1
饲料样品中干物质含量 %	21.4	21.0	19.7
饲料样品中粗蛋白含量 %	17.2	16.3	17.4
平均蛋重 g	49.7	50.7	50.7
平均产蛋率 %	59.9	61.9	60.2
平均料蛋比	3.12:1	3.00:1	3.09:1
破蛋率 %	1.4	1.6	1.6
干物质表观消化率 %	66.9	67.7	69.7
粗蛋白表观消化率 %	58.1	59.0	65.1

2) 蛋鸡饲料粉碎粒度研究 前苏联的资料认为：蛋鸡的最佳粒度为 0.2~1.0 mm。但是对于选择多大粒度以及粒度对蛋鸡的生产性能有何实际影响，还没有一个可供参考的结果。我国蛋鸡配合饲料的国家标准中规定产蛋鸡产蛋期配合饲料的粒度要求为：全部通过 4.00mm 编制筛筛孔，但不得有整粒谷物，2.00mm 编制筛筛上物不得大于 15%。但这一标准对指导实际生产还有较大距离。王卫国等针对国内饲料生产厂家在产蛋鸡饲料的加工中通常采用 5~8mm 筛孔直径的情况，进行粒度比较试验。目的在于考察采用 5mm、7mm 和 8mm 三种孔径粉碎的玉米、豆粕制成配合饲料对产蛋鸡的生产性能、饲料转化率有何影响，试图找出适宜的粉碎粒度，以供进一步研究和生产推广。粉碎后物料的几何平均粒度对玉米为 447、532、541 $\mu\text{m}$ ，豆粕粒度为 646、703、780 $\mu\text{m}$ ，配合饲料的粒度为 397、466、479 $\mu\text{m}$ 。

综合各方面的指标来看，本次试验的三种粉碎粒度对试验蛋鸡的生产性能无显著影响。对于干物质、粗蛋白的消化吸收有一定的影响，但也不显著( $P>0.05$ )。但综合考虑，在本试验条件下，选择 7mm 直径的筛孔作为产蛋鸡饲料粉碎粒度的控制为佳。因为从生产性能指标来看三者之间无显著差异。但从饲料的干物质和粗蛋白质的消化率上看，7mm 筛孔为最佳选择。同时，从控制加工成本和降低饲料成品的分级来讲，也以 7mm 孔径的筛片为好。

#### 5. 鱼饲料的粉碎粒度研究

鱼饲料的最佳粉碎粒度研究报道较少，NRC1993 的鱼类营养需要中建议为小于 500 $\mu\text{m}$ 。对鳊鱼饲料的粉碎要求是，白仔鳊饲料 98%通过 100 目筛，黑仔鳊饲料 98%通过 80 目筛，成鳊饲料 98%通过 60 目筛。鳊鱼饲料的 90~95%的原料都需进行微粉碎。而对鳖饲料的粉碎粒度要求是：稚鳖开口料，120 目筛筛上物不大于 5%；稚鳖饲料和幼鳖饲料，100 目筛上物不大于 5%；成鳖饲料和亲鳖饲料，80 目筛上物不大于 5%。

王卫国等(2001)进行了一项鲤鱼鱼种饲料的粉碎粒度的试验，试验的结果见表 8。

由表 8 可见，粒度为 177 $\mu\text{m}$  的饲料在干物质消化率、粗蛋白质消化率、消化能水平、日增重、饲料散失率方面都显著优于粒度为 189 $\mu\text{m}$  和 229 $\mu\text{m}$  的饲料( $P<0.01$ )，而粒度为 189 $\mu\text{m}$  的饲料又优于 229 $\mu\text{m}$  的饲料。因此 177 $\mu\text{m}$  应是最佳粉碎粒度。

表 8 鲤鱼鱼种饲料粉碎粒度实验结果

项 目	177 $\mu$ m 饲料	189 $\mu$ m 饲料	229 $\mu$ m 饲料
干物平均消化率 %	74.02	70.00	62.77
蛋白平均质消化率 %	90.01	88.33	78.49
平均消化能 KJ	310.72	275.67	242.88
平均日增重 g	0.20	0.116	0.07
饲料散失率 %	13.54	15.23	16.74

### 饲料粉碎粒度与粉碎机筛片孔径的关系

作者等人对饲料原料与产品粉碎粒度与筛片孔径的关系进行了研究,结果如下。

#### 1. 原料粉碎粒度与粉碎机筛片孔径

表 9 玉米、豆粕粉碎粒度与粉碎机筛片孔径

材 料	筛片孔径 (mm)					
	8.0	7.0	5.0	4.5	3.0	2.5
玉米 $d_{sw}$ , $\mu$ m	541.0	527.5	447.0	431.5	352.0	261.0
$s_{sw}$ , $\mu$ m	2.51	2.32	2.37	2.32	2.10	2.01
孔径/ $d_{sw}$	14.8	13.3	11.2	10.5	8.5	9.6
豆粕 $d_{sw}$ , $\mu$ m	780.0	703.0	646.0	498.0	414.0	388.0
$s_{sw}$ , $\mu$ m	1.99	1.98	1.93	1.89	1.90	1.78
孔径/ $d_{sw}$	10.30	9.96	7.74	9.04	7.25	6.44

注：粉碎机为 FSP112x30；玉米水分 10.7 %；豆粕水分 9.6 %。

对 FSP112X30 粉碎机筛片筛孔直径与玉米、豆粕的对数几何平均粒径（表 9）的关系用 SPSS 统计学软件进行方差分析，结果表明，为极显著水平，并得到二者的线形回归方程：

对玉米的几何平均粒度 Y 有： $Y=191.4+47.035X$

对豆粕的几何平均粒度 Y 有： $Y=210+72.298X$

对线形方程的常数项和系数进行 t 检验，均达到极显著水平（ $P < 0.01$ ）。

FSP118x40 型锤片微粉碎机筛孔直径与鱼饲料产品的粉碎粒度、粉碎比的关系见图 1。由图可见，粉碎粒度随筛孔直径减小逐渐下降，但与 FSP112x30 粉碎机采用较大的筛孔直径相比，粒度降低的幅度大大降低，几何标准差也变动较小。

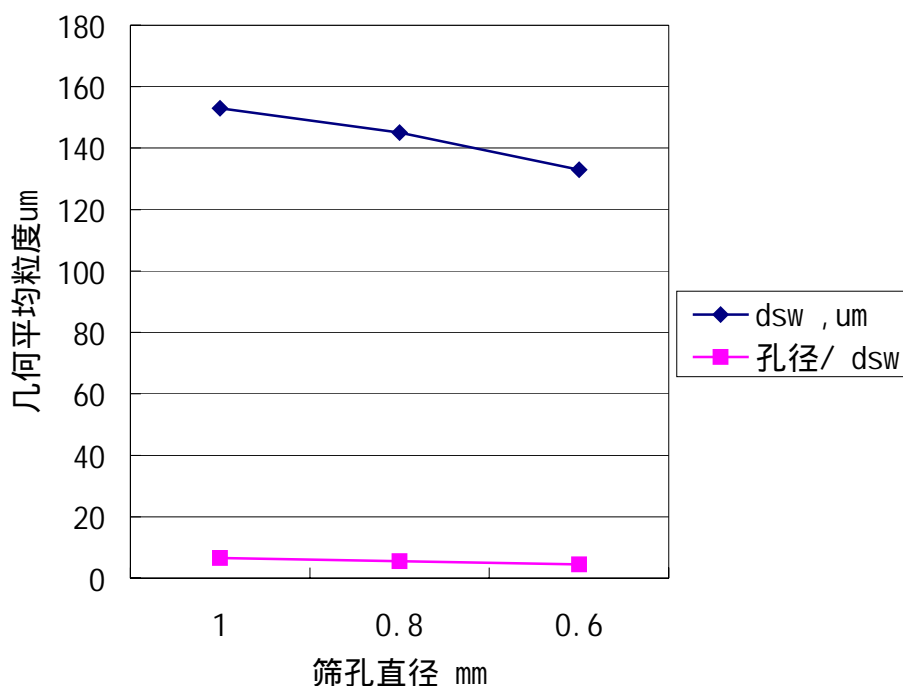


图 1 FSP118x40 粉碎机筛孔直径与粉碎粒度、粉碎比

对 FSP118x40 型锤片微粉碎机筛孔直径与鱼饲料产品的粉碎粒度关系进行线性回归，得到如下回归公式：

$$Y=103.667+50X \quad \text{相关系数 } R=0.993。$$

对 FSP118x40 型锤片微粉碎机筛孔直径与鱼饲料产品的粉碎粒度关系进行显著性检验，达到显著水平。

应用上述回归公式可以预测达到要求产品粒度使用的粉碎机筛片孔径。在配合

饲料中，玉米是能量饲料的主体，豆粕是蛋白质饲料的主体，控制了这两种饲料原料的粉碎几何平均粒度，也就基本可控制了配合饲料的粒度。

而常用的磷酸氢钙、磷酸二氢钙、沸石粉、钙粉、贝壳粉的粉碎几何平均粒度分别为：50um, 75um, 380um, 65um、490um。当然，不同厂家的产品的粒度是有差异的。

## 2. 产品几何平均粒度与筛片孔径的关系

我们对某些饲料产品的粉碎粒度和筛片孔径的关系进行了测定，见表 10 和表 11。

由表 10 可见，当采用粉碎筛片孔径为 8、7、5mm 时，粉碎成品的产品的几何平均粒度分别为筛孔直径 1/13、1/9.3、1/13。

表 10 禽料粉碎粒度与筛片孔径的关系

材 料	筛片孔径 ( mm )		
	8.0	7.0	5.0
禽料 $d_{sw}$ , um	467.0	450.0	397.0
$s_{sw}$ , um	2.65	2.19	2.40
孔径/ $d_{sw}$	17.13	15.56	12.60
符合国标	符合	符合	符合

表 11 猪料粉碎粒度与筛片孔径的关系

材 料	筛片孔径 ( mm )		
	4.5	3.0	2.5
猪料 $d_{sw}$ , um	345.0	323.0	282.0
$s_{sw}$ , um	2.32	2.03	2.01
孔径/ $d_{sw}$	13.04	9.29	8.87
符合国标	符合	符合	符合

由表 10、11 可见，饲料成品的几何平均粒度通常要小于饲料主要粉碎原料的平均粒度，因为大多数矿物饲料、添加剂的粒度较小。同时，我国大多数饲料企业在畜禽饲料加工中采用的筛片孔径较小，成品的粒度通常能达到国家标准规定的粒度要求。但对于最适粉碎粒度尚没有被广大企业所重视。

## 饲料粉碎粒度与能耗的关系

王卫国等（2001）对饲料粉碎粒度与能耗的关系进行了初步研究，结果见表 12、13、14。

表 12 7 种饲料原料在 5 种筛孔直径下粉碎后的对数几何平均粒度（ $\mu\text{m}$ ）

原 料	未粉碎	粉碎 (4mm 筛)	粉碎 (2.5mm 筛)	粉碎 (1.5mm 筛)	粉碎 (1.0mm 筛)	粉碎 (0.6mm 筛)
去皮豆粕 (东海)	748 <sup>a</sup>	574 <sup>b</sup>	527 <sup>c</sup>	465 <sup>d</sup>	322 <sup>e</sup>	213 <sup>f</sup>
带皮豆粕 (东海)	965 <sup>a</sup>	688 <sup>b</sup>	619 <sup>c</sup>	549 <sup>d</sup>	340 <sup>e</sup>	217 <sup>f</sup>
带皮豆粕 (当地)	1568 <sup>a</sup>	670 <sup>b</sup>	548 <sup>c</sup>	468 <sup>d</sup>	388 <sup>e</sup>	293 <sup>f</sup>
棉粕	747 <sup>a</sup>	410 <sup>b</sup>	347 <sup>c</sup>	308 <sup>c</sup>	221 <sup>d</sup>	182 <sup>d</sup>
菜粕	535 <sup>a</sup>	329 <sup>b</sup>	288 <sup>c</sup>	271 <sup>c</sup>	231 <sup>d</sup>	222 <sup>d</sup>
玉米	6801 <sup>a</sup>	643 <sup>b</sup>	550 <sup>c</sup>	548 <sup>c</sup>	389 <sup>d</sup>	340 <sup>e</sup>
麸皮	621 <sup>a</sup>	539 <sup>b</sup>	441 <sup>c</sup>	415 <sup>d</sup>	262 <sup>e</sup>	244 <sup>f</sup>

注：同一行内标有不同字母者表示差异显著，标有相同字母者表示差异不显著。

表 13 在不同筛孔直径下粉碎不同饲料原料时的吨粉碎电耗 (kwh/t)

原 料	粉 碎 (4mm 筛)	粉 碎 (2.5mm 筛)	粉 碎 (1.5mm 筛)	粉 碎 (1.0mm 筛)	粉 碎 (0.6mm 筛)
去皮豆粕 (东海)	3.75	5.00	5.63	21.00	36.63
带皮豆粕 (东海)	6.25	6.87	7.50	23.30	40.20
带皮豆粕 (当地)	6.67	7.50	10.00	25.35	46.00
菜粕	5.00	5.00	6.67	10.00	21.65
棉粕	6.00	7.50	10.00	35.00	41.67
玉米	6.85	8.35	10.00	21.50	31.67
麸皮	22.22	23.35	26.67	40.00	71.67

表 14 饲料原料粉碎几何平均粒度 X 与电耗 Y 的回归方程

饲料原料	回归分析	R <sup>2</sup>	差异显著性
去皮豆粕 (东海)	$Y=87.0992-0.2885X+0.0002X^2$	0.996	P< 0.005
带皮豆粕 (东海)	$Y=83.6088-0.2409X+0.0002X^2$	0.999	P< 0.005
玉米	$Y=122.085-0.3705X+0.0003X^2$	0.987	P< 0.05
带皮豆粕 (当地)	$Y=163.771-0.5319X+0.0004X^2$	0.992	P< 0.01
棉粕	$Y=114.666-0.4207X+9.2*10^{-7}X^3$	0.983	P< 0.05
菜粕	$Y=198.682-1.2864X+0.0021X^2$	0.790	P> 0.05
麸皮	$Y=e^{(2.171+459.627/X)}$	0.882	P< 0.05

由表 13 可以看出：1) 不同原料在同一种筛孔直径下吨粉碎电耗差异显著。这主要决定原料本身的物理和化学性质、水分含量等。如去皮豆粕因粗纤维含量低而粉碎电耗相对较低，玉米的粉碎电耗居中，而麸皮的粉碎电耗最高。菜粕粉碎电耗较低是因为其原始粒度很小，在通过筛孔时较容易。麸皮的粉碎能耗较高，是因为其含有较高的粗纤维，质地柔软，锤片的撞击作用难以使其粉碎。当饲料原料被粉碎通过 1.0mm 和 0.6mm 的筛孔时，由于原料性质差异引起的不同原料的电耗差异占主要地位。2) 将同一种原料在不同筛孔下粉碎，吨粉碎电耗随筛孔直径的减小而增大。应用 SPSS 软件将粉碎粒度与电耗数据关系进行曲线拟合回归，得到的回归方程见表 14。

由表可见，粉碎电耗与原料粉碎的几何平均粒度的关系不是线性关系，而是一种曲线关系。随着粉碎粒度减小，特别是通过 1.0 和 0.6mm 孔径时，粉碎能耗急剧增加。所以，生产水产饲料时，由于要进行微粉碎或超微粉碎，使饲料的对数几何平均粒度达到 250um 以下，往往需要耗费较高的能量，导致加工成本较高。因此，在粉碎过程应将饲料粉碎粒度控制在最适范围。

## 生产中粉碎粒度、效率的控制

实际生产中控制饲料粉碎粒度与变异以及粉碎效率的方法有下列几种。

### 1. 选择正确的粉碎机机型

目前粉碎机形式主要有卧轴锤片粉碎机、立轴锤片粉碎机、卧轴锤片微粉碎机、立轴微粉碎机、气流分级无筛微粉碎机、气流分级有筛微粉碎机、对辊式磨粉机、秸秆类切碎机、粉碎机、揉碎机等。卧轴锤片粉碎机中应择筛片面积大者和具有破坏环流层结构的水滴型粉碎机以及具有调节粗碎和细碎功能的粉碎机。这方面国内外的先进设备有 Champion 系列，Jacobson 系列，正昌冠军系列和牧羊水滴王系列等；立轴锤片粉碎机与卧轴型相比具有较大的筛片面积（环筛+底筛），较大的排料空间，其结构更有利于物料依重力流出。这些均有利于避免过度粉碎，提高产品的粒度均匀性。该机作业时物料为轴向多点进料，与锤片的相对速度差大，有利于粉碎。该类产品的代表有 Kahl，Buhler，牧羊，正昌，申德等公司的产品；横宽形振动筛锤片粉碎机是一种新型粉碎机，它的独特结构是具有两层可振动的筛片，内筛孔径大，可使物料迅速通过筛面，外筛孔径小，用于精确控制物料的粒度。振动筛面可保持筛面不堵，避免物料过度粉碎。

当生产普通水产饲料时必须选择微粉碎机。而普通带筛片的微粉碎机的粉碎粒度达到 95%通过 0.15mm 筛孔是困难的，否则效率将非常低下，它们可以满足一般鱼

类（如鲤鱼、草鱼等）或较大鱼的饲料粉碎要求。采用气流分级的有筛和无筛微粉碎机可以满足鳊鱼、虾饲料等的加工要求，其粒度可以方便地无级调整（在一定范围内）。具有内置分级筛网或装置的气流分级微粉碎机有较大的优越性。它们可以简化设备的管理，节省投资。

在加工牛羊饲料时需要对秸秆、干草类原料进行切碎、粉碎和揉碎，因而选择集这三种功能于一体的机型最为恰当。这里，切碎的功能应满足切不同种类秸秆和干草以及可连续调节切碎长度的要求。目前，我国已有这种产品。

## 2. 选择恰当孔径和开孔率的优质筛片

筛片孔径是决定粉碎粒度的主要因素。当粗略控制时，筛孔孔径可选比产品粉碎几何平均粒径大一倍。当精确控制时，需要通过试验确定，并且这一控制条件随配方原料的变化而不同。开孔率是影响粉碎效率的重要因素。开孔率高意味着高产量。同时可增大粉碎产品的几何平均粒度。国产微粉碎机筛片的开孔率在孔径 1.5mm 以下时偏低（比国外产品低 5~15%）。筛片的厚度和寿命较欧美产品低。因此，需要进一步提高国产筛片的制造质量。

## 3. 配置合理的粉碎工艺

粉碎工艺的组合对粉碎粒度和效率有至关重要的影响。

**喂料系统** 喂料器必须保证稳定均衡的喂料。目前，可供选择的喂料器有螺旋喂料器，叶轮喂料器，振动喂料器，皮带喂料磁选机，重力分级喂料器和带循环风的重力分级喂料器。这些喂料器都可实现根据主机负荷自动调节喂料量，也都可通过自带或附加磁选装置清除铁杂。螺旋喂料器的优点是进料口与出料口的距离可由料仓与粉碎机之间的距离确定。设计布置上灵活，但供料还是有脉动现象。振动喂料器的缺点是噪声大，密闭性差，需要改进。叶轮喂料器，皮带喂料机和重力喂料器均能较好地满足粉碎机的喂料要求，重力喂料器还可分离石块砖块等较重的杂质。

**恰当的吸风系统** 对粉碎机吸风与不吸风相比可提高粉碎产量 10~30%。吸风系统设计的关键一是正确配备吸风量，对普通粉碎机，每平方米筛片每分钟 45~60 立方米；对微粉碎机，每平方米每分钟为 50~70 立方米；二是使吸风口的风速控制在足够低的水平，以免粉碎料被吸走；三是要防止系统漏风。对立轴粉碎机也应考虑吸风。对微粉碎机应采用气力输送并兼顾吸风。

**高效的分级设备** 可在粉碎前或粉碎后加分级筛。将粉碎料或待粉碎料进行筛分。符合粒度要求的物料作为粉碎成品，过大的颗粒送回粉碎机中再粉碎。目前国产分级筛主要有高效分级平筛和回转振动筛。二者都缺大产量高效设备。另外，粉

碎机后加气流分级机也是提高粉碎效率的有效手段。它可任意调节产品的粒度。

采用二次粉碎工艺 谷文英等（1985，1987）对单一循环粉碎工艺与一次粉碎工艺进行的比较研究表明，单一循环粉碎工艺由于在粉碎机后加了分级筛，扩大了粉碎机筛片的孔径，生产猪鸡饲料的情况下，使粉碎机产量提高 30%，电耗降低 25% 以上。我们所做的实验表明，采用粉碎机—分级筛—微粉碎机工艺与粉碎机—微粉碎机工艺生产鱼饲料，前者比后者产量提高 20%，微粉碎电耗降低 20% 以上（1999）。李锡金（1997）对鳗鱼饲料粉碎粒度的研究表明，采用微粉碎—气力输送—分级筛的循环粉碎工艺与不用分级筛工艺相比，加工白仔料（98% 通过 100 目）的生产率提高了 30%，小时吨料电耗降低 40 度。

采用先配料后粉碎工艺 该种工艺有利于控制饲料产品粒度的均匀性，有利于某些油性物料和粘性物料等的粉碎，适合于加工含副产品较多的畜禽饲料和水产饲料以及宠物饲料。

设备的正确操作维护 要除去原料中的金属杂质和其它有害物质，保护粉碎机的锤片，筛片，防止筛片被打破而不能控制产品粒度。粉碎机不能超负荷工作。要及时做好设备的清洁和保养。应根据产品和原料的变化及时调整操作条件。

## 粉碎成本的控制

粉碎成本占饲料加工成本的很大部分。因此降低本项成本可明显提高经济收益。所有能提高生产效率，降低支出的措施都应重视。

### 1. 控制粉碎系统的设备投资额

在这一点上，关键是在可能的投资内充分考虑粉碎工艺与设备技术的先进性和实用性，能满足加工不同产品的灵活性要求，追求在长期运行中的低成本和设计寿命中的最大收益。必要时在设计中考虑未来技术改进的余地。例如，采用立轴粉碎机或高效卧轴粉碎机并配以有效的吸风系统；选择气流分级型微粉碎机，采用循环粉碎或粉碎—分级—粉碎的二次粉碎工艺。

### 2. 控制设备易损件的成本

粉碎系统的易损件主要有锤片、筛片、销轴。其中锤片和筛片的消耗量很大。通过生产记录和采购单可以统计出每组锤片和每片筛片粉碎饲料的产量（寿命），求出粉碎每吨饲料的锤片和筛片的成本。选用不同厂家或不同质量的锤片，筛片并结合正确使用方法的探讨，可以找出最经济的易损件生产厂家。目前优质锤片每片的加工寿命可达 40~50 吨，而普通锤片的寿命仅为每片 20 吨。国产筛片的工作寿命

一般在 40 小时以上（带负荷工作）。

### 3. 控制操作维护成本

控制操作成本的要点是：保持原料的清洁；保持设备负荷均衡；保持设备的最佳吸风；保持分级设备处于最佳分级效率；正确排序加工，减少换筛片和换料的频率；合理使用锤片的四角，发挥锤片的最大效能；严格按操作规程安全操作。控制维护成本的要点是：制定详细的设备维护计划和日历并严格执行；按设备要求正确润滑设备；保持设备清洁；及时对磨损和有故障的设备进行维护，使之处于完好状态；精心计划，降低维护中的费用。

### 4. 控制安全成本

粉碎工段是易产生安全问题的位置，必须做好防火、防粉尘爆炸、防设备损坏和防止出现人身安全的事故。任何一项安全事故的发生都有可能造成业主的巨大成本。

### 5. 研究最佳粉碎粒度与粒度变异控制限，控制质量成本

饲料粉碎的目的是为了能提供使饲养动物获得最佳生产性能的饲料产品。从此目标出发，必须研究特定饲养动物对特定饲料的最佳利用粉碎粒度及其允许变异范围，并据此研究经济高效的粉碎技术，谁掌握了此技术，谁就能为用户或市场提供高质量的产品，就能从市场获得高额的回报。

### 6. 控制饲料损耗

饲料在粉碎过程中的损耗主要有水分和粉尘损耗。若以重量损耗 1% 计，一个年产 10 万吨饲料的工厂，粉碎料占 70%，年损失饲料可达 700 吨。若以每吨饲料 1500 元计，年损失人民币 105 万元。可见控制损耗非常重要。控制水分损耗的办法就是要避免过度粉碎，降低粉碎室内的温度。而控制粉尘损耗的办法是要防止粉尘外扬，还应将吸风吸出的粉尘加回到饲料中。

## 未来饲料粉碎技术的发展趋势

本世纪八十至九十年代，饲料粉碎技术方面取得了长足的进步。未来的主要研究方向是：

- (1) 鱼虾饲料原料、配合饲料的最佳粉碎粒度研究。
- (2) 反刍动物饲料原料与产品的最佳粉碎粒度研究。
- (3) 新型锤片粉碎机的粉碎粒度与性能的研究。
- (4) 微粉碎机及微粉碎系统对饲料粉碎粒度的影响研究。

- (5) 不同饲料原料粉碎粒度对膨胀、挤压膨化效果的影响研究。
- (6) 适合新型饲料原料如高油玉米等的粉碎设备和工艺研究。
- (7) 进一步提高粉碎机的锤片和筛片的质量，降低易损件成本。
- (8) 进一步提高粉碎系统作业效率和自动化水平。
- (9) 可连续调节锤筛间隙和快速更换筛片与锤片的粉碎机的研究。
- (10) 研制高效秸秆和草类粉碎机。

## 参考文献

王卫国 饲料粉碎粒度对营养价值、动物生产性能的影响及粉碎成本的控制 饲料工业 1999 年第 20 卷第 10 期。

K. J. Wondra etc. Effects of mill type and particle size uniformity on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs, J. Anim. Sci. 1995. 73:2564—2573。

Giesemann, etc. Effect on particle size of corn and grain sorghum on growth and digestibility by growing pig. J. Anim. Sci. 68(suppl. 1):104。

P. W. Waldroup Searching for optimum particle size Feed Management 1997 Oct. V48: 30-36。

D. J. Castaldo Formulation and ingredient particle size. Feed International, May, 1997 p20-21。

Clayton Gill Particle size: Preference by species. Feed International Apr. 1996。

王卫国 饲料粉碎粒度研究 粮食与饲料工业 2000 (8) 22-23。

梁浩仪, 张子仪. 用离体法评定饲料蛋白质和氨基酸利用率的研究, 中国畜牧杂志, 1988, 4: 13 - 17。

冯定远等. 应用改良胃蛋白酶体外法评定水牛皮蛋白粉的营养价值, 1996。

罗莉等. 长吻鲈、南方大口鲶和鲤鱼对九种蛋白质饲料的离体消化率测定 1996。

熊易强 加工温度和保温时间对热处理全脂大豆的脲酶活性、胃蛋白酶消化率和瘤胃可降解蛋白（体外测定）的影响 饲料技术讲座文集 美国大豆协会 1999。

刘造珍 乐国伟等 饲料蛋白质体外消化率及其影响因素的研究 四川农业大学学报 1996（14）：51-57。

王卫国等 饲料粉碎粒度与蛋白质体外消化试验研究 粮食与饲料工业 2000（11）16-19。

Keith C. Behnke et. Particle size reduction Nutritional impace vs. cost . American Soybean Association, 1999。

王卫国等 仔猪配合饲料的粉碎粒度研究 饲料工业 2000（11）22-24。

王卫国 饲料粉碎技术 ASA 2000。

宿坤根等 立式粉碎机与其他粉碎机的差异和应用前景 中国饲料 1998（21）15。

过时东 饲料循环粉碎工艺的应用 中国饲料 1995（2）27。

徐新武 饲料粉碎机吸风系统的改进与研究 中国饲料 1995（17）31。

罗建摸等 饲料加工技术对饲喂价值的影响 中国饲料 1996（3）20。

谷文英等 二次粉碎工艺研究 饲料工业 1985（2）24-30。

林文旭 关于对虾加工工艺的探讨 粮食与饲料工业 1997（5）12。

李锡金 控制鳊鱼饲料微粉碎粒度的研究与实践 粮食与饲料工业 1997（9）13。

张延利 加工技术对饲料营养价值和动物生产性能的影响 粮食与饲料工业 1997（10）14。

王卫国 21世纪国际饲料加工工艺与设备技术展望 饲料工业 1999（9）

俞信国等 横宽型振动筛锤片粉碎机 上海饲料 1998（6）33 - 36。

Clayton Gill Hammer mills for ' structural 'grinding :Going vertical Feed International 1998 ( June ) 28-30。

Jan Van Rouwendal Feed mill automation 2000 Feed International 1998 ( July ) 18-22。

曾虹等译 NRC 鱼类营养需要 1993 版中国农业科技出版社 1995。

E . R . Ørskov Feed Science Elsevier Science Publishers B. V. 1988。

全国饲料标委会 饲料工业标准汇编 中国标准出版社 1996。

浙江省地方标准 中华鳖配合饲料 DB33/221—1998。